

СРАВНЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ПОДВИЖНОСТИ ПУТЁМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ

А.Ю. Привалов, А.А. Царёв

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В системе имитационного моделирования OMNET++ реализованы две модели движения узлов (известной модели SLAW и разработанной авторами гибридной модели) и два простейших протокола маршрутизации в DTN сетях. С помощью данных протоколов проведена экспериментальная сравнительная оценка адекватности данных моделей движения узлов в DTN сетях. В результате экспериментов продемонстрировано, что гибридная модель перемещений имеет близкие показатели с моделью SLAW, такие как время контакта между узлами (inter-contact time (ИТС)), вероятность доставки пакета, распределение вероятностей задержки доставки пакетов.

Ключевые слова: Модель человеческой подвижности, моделирование беспроводных сетей, протокол маршрутизации.

Введение

Наличие адекватной модели перемещений узлов в беспроводных сетях очень важно для корректной оценки производительности сетей в моделировании поведения реальных сетей. Это особенно важно для такого класса беспроводных сетей, как сети, терпимые к задержкам (delay-tolerated networks (DTN)). Данные сети характеризуются короткими сеансами связи, поэтому в некоторый момент времени фактического соединения между источником сообщения и его получателем может не существовать, и появиться только в случае изменения положения узлов сети. Поэтому адекватность модели перемещений реальным перемещениям является ключевым фактором в правильной оценке таких фундаментальных характеристик протоколов DTN сетей, как вероятность доставки сообщения и распределение вероятностей задержки доставки пакета. Поэтому в течение последнего десятилетия многие работы были посвящены исследованию реальных человеческих перемещений и разработке адекватной модели перемещений.

Современные исследования выявили такие важные особенности человеческой мобильности, как кластеризация т.н. путевых точек, а также распределение Леви у длин перемещений между этими путевыми точками [1-4]. Эти особенности следует учитывать, чтобы обеспечить корректное моделирование движения узлов в DTN сетях. Существует много современных хорошо известных моделей, таких как модель TLW [4] и другие, которые способны смоделировать некоторые из упомянутых особенностей реальных человеческих перемещений, но не все из них.

В последнее время [7-8] был представлен новый тип моделей, который можно обозначить как SLAW-подобные модели (Self-Similar-Least Action Walk), и которые способны одновременно смоделировать несколько важных особенностей реальных человеческих перемещений. Сравнения, сделанные в [7], показывают, что эти модели лучше моделей из [4-6] в моделировании особенностей реальных человеческих перемещений. Но, как было показано в работе [9], SLAW-подобные модели требуют больше времени на вычис-

ления. Это обстоятельство важно, если модели используются для моделирования DTN сетей с большим количеством узлов. В работе [9] нами была предложена гибридная модель человеческой мобильности, которая сочетает в себе особенности модели, основанной на перемещениях Леви и особенности модели SLAW, но по вычислительной сложности является эффективнее чем SLAW.

В данной работе показано, что гибридная модель обеспечивает весьма близкие к модели SLAW, считающейся одной из самых адекватных моделей человеческой подвижности, статистические характеристики протоколов маршрутизации (ITC, распределение вероятностей задержки доставки пакетов, вероятность доставки пакета).

Краткое описание SLAW-подобных моделей и гибридной модели

SLAW-подобные модели рассматривают человеческую мобильность как прямолинейные переходы между путевыми точками, где люди останавливаются на определённый промежуток времени. Хорошо известно, например, [4], что дистанция между последовательными путевыми точками имеет распределение вероятностей близкое к распределению Леви. Время, проведённое в путевой точке, имеет распределение вероятностей тоже близкое к распределению Леви. Эти особенности хорошо воспроизводятся моделью перемещений на основе распределения Леви (например, [4]), однако кластеризация путевых точек не воспроизводится данной моделью.

В SLAW-подобных моделях кластеры точек извлекаются из реальных трасс. Для этой цели, реальная трасса обрабатывается для нахождения путевых точек и для последующей группировки найденных точек в кластеры. Также SLAW-подобные модели используют параметр самоподобия (дисперсию), полученный из реальной трассы [8].

Когда генерируется трасса, её путевые точки распределяются внутри каждого кластера с использованием параметра самоподобия, полученного на основе реальной трассы. Как показано в работе [7], для обеспечения Леви распределения расстояния между последовательными путевыми точками, последние должны быть посещены согласно алгоритму «принцип наименьшего действия при перемещении» (Least Action Trip Principle (LATP)), и после посещения всех путевых точек внутри одного кластера выбирается следующий кластер, также согласно принципу LATP, только используя расстояния между центрами кластеров, вместо расстояния между путевыми точками.

Согласно LATP, следующий кластер для посещения (так же, как и путевая точка) выбирается с вероятностью, обратно пропорциональной дистанции до него в некоторой степени (параметр модели). Например, если текущий кластер i и набор кластеров V , тогда вероятность выбора следующего кластера с номером j вычисляется следующим образом:

$$\Pr\{i \rightarrow j\} = \frac{\left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^p}{\sum_{k \in \{V-V'\}} \left(\frac{1}{d_{ik}}\right)^p} \quad (1)$$

где d_{ij} это евклидово расстояние от кластера i до j , параметр p фиксированное вещественное число со значениями $[0; +\infty)$, также V' это набор кластеров из V , которые уже

были посещены. В модели два разных параметра p – один для путевых точек, второй для локаций.

Фактически, для вычислений согласно LATP для N путевых точек требуется вычислить $N(N-1)/2$ расстояний между путевыми точками, т.е. $O(N^2)$ операций. Это может требовать большого количества времени, в то время как предлагаемая гибридная модель может преодолеть данный недостаток. Гибридная модель также использует кластеры, которые были найдены через обработку реальных трасс.

В начале моделирования каждый пользователь получает информацию о его трассе в виде набора кластеров, которые должны быть посещены в процессе моделирования. Пользователь выбирает первый кластер и выбирает случайную точку внутри в качестве стартовой. Затем он перемещается внутри кластера, совершая перемещения и паузы, соответствующие длине и длительности которых распределены по закону Леви. Плотность вероятности одного шага Леви

$$f_x(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-itx - |ct|^\alpha) dt \quad (2)$$

Обычно направление, выбираемое при генерации прыжка, имеет равномерное распределение, однако в гибридной модели при генерации прыжка используется такой выбор направления, чтобы избежать выхода за пределы кластера. Сначала производится случайный выбор направления прыжка. Если этот прыжок выходит за пределы кластера, то данное направление изменяется таким образом, чтобы по возможности остаться в текущем кластере. Если после изменения направления узел всё равно выходит за пределы кластера это означает, что пришло время сменить кластер.

Перемещения между кластерами, так же, как и в SLAW модели, совершаются согласно алгоритму LATP. Из набора кластеров, полученного в начале моделирования, и из которого удалены уже посещённые кластеры, выбирается очередной кластер с вероятностью (1).

Очевидно, что время вычислений при перемещениях внутри кластера пропорционально числу путевых точек внутри кластера, т.е. $O(N)$. Следовательно, для большого числа N мы можем ожидать, что данная модель будет быстрее, чем модель SLAW.

Описание протоколов маршрутизации

Для маршрутизации пакетов в DTN сетях используется несколько простых эвристик. Непосредственными соседями или просто соседями будем называть те узлы, которые имеют активное соединение с текущим узлом на данный момент. Эвристики должны принять решение о том, в каком направлении (какому соседу) посылать пакет, если непосредственное соединение с узлом назначения отсутствует. Если у узла i есть пакет, адресованный узлу j , то проверяется наличие непосредственного соединения с узлом j (эвристика передачи пакета в один прыжок). Если же в числе непосредственных соседей нет целевого узла, тогда пакет посылается первому попавшемуся узлу, который соединён с целевым (эвристика передачи пакета в два прыжка). Если ни одно из предыдущих усло-

вий не выполнилось, тогда решение пытается найти эвристика, которая посылает пакет от узла i тому непосредственному соседу, который позже всех (включая сравнение с текущим узлом i) «видел» целевой узел j (то есть, имел активное соединение с этим узлом). Если таких узлов несколько, то пакет посылается случайному из них. Данная эвристика носит название LET – Last Encountered Time [10] и с её помощью в процессе маршрутизации передаваемый пакет «стремиться догнать» свой пункт назначения.

Экспериментальные результаты

Для сравнения результатов моделирования на основе гибридной модели и модели SLAW, данные модели были реализованы в среде имитационного моделирования OMNET++ [11] с помощью фреймворка INET [12] (подробнее описано в работе [9]). Реальные трассы были взяты из [13]. Также самоподобные параметры обязательные для SLAW модели вычисляются соответственно формулам из [8].

Цель экспериментов – сравнить основные характеристики протоколов маршрутизации: распределение вероятностей ICT, распределение вероятностей задержки доставки пакетов или распределение времени жизни пакетов (TTL) и вероятность доставки пакета – для разных моделей мобильности, и, на основании данного сравнения, показать адекватность предложенной нами гибридной модели, не меньшую чем у SLAW модели, а также большую эффективность гибридной модели в смысле затрат вычислительных ресурсов.

Далее представлены результаты для двух наборов данных из коллекции [13]: набор от KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) и набор от NCSU (North Carolina State University).

Все наборы данных собирались одинаковым образом: некоторое количество добровольцев (студенты университета) в течение дня носили в кармане GPS приёмники, которые записывали своё положение каждые 30 секунд. Эти данные использовались для нахождения реальных путевых точек, кластеров путевых точек и других параметров для SLAW и гибридной моделей.

Обе модели запускались для 30 узлов на протяжении 24 модельных часов. На рисунках 1-2 изображены функции распределений CCDF для времени взаимодействия узлов (inter-contact time (ICT)) и времени жизни пакетов (time to live (TTL)) соответственно, для территории KAIST. На рисунках 3-4 изображены те же распределения для территории NCSU. Они показывают, что гибридная модель имеет схожие результаты по обеспечению характеристик ICT и TTL. Оценка вероятности доставки пакета для обеих территорий представлена в Таблице 1.

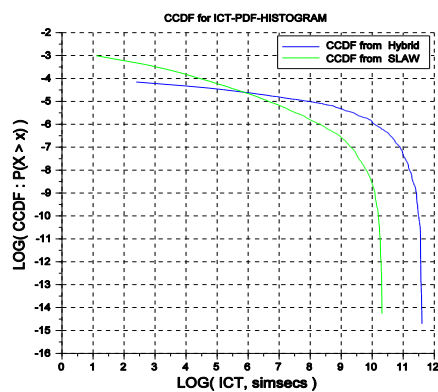


Рис. 1. Распределение ICT на KAIST

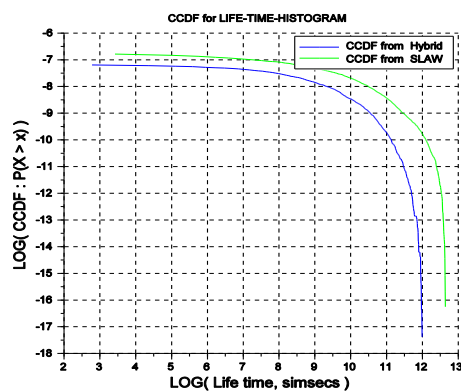


Рис. 2. Распределение TTL на KAIST

Табл. 1. Оценка вероятности доставки пакета

Набор данных	SLAW модель	Гибридная модель
KAIST	0.93	0.79
NCSU	0.78	0.76

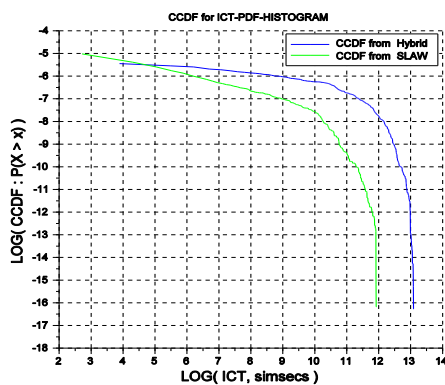


Рис. 3. Распределение ICT на NCSU

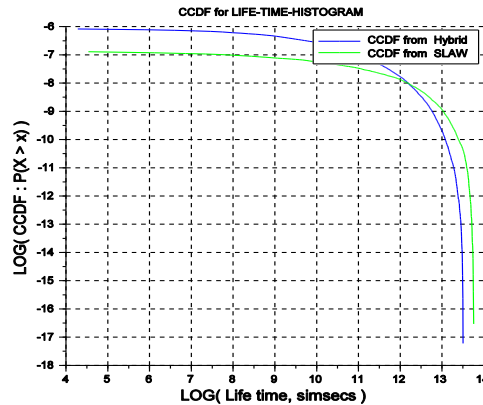


Рис. 4. Распределение TTL на NCSU

Заключение

Представлена гибридная модель человеческой мобильности. Данная модель воспроизводит такие важные характеристики реальных перемещений, как распределение Леви расстояний между последовательными путевыми точками и кластеризацию путевых точек, а также является более быстрой в моделировании, чем SLAW модель, считающаяся в настоящее время одной из самых адекватных моделей человеческой мобильности. Адекватность предложенной гибридной модели демонстрируется сравнением характеристик протоколов маршрутизации при их работе в DTN сети, мобильность узлов в которой моделируется с помощью двух указанных выше моделей. Для обеих моделей характеристики протоколов оказываются весьма близкими. При этом, гибридная модель даёт, как правило, худшие оценки параметрам работы протоколов, и потому её результаты могут служить в качестве консервативных оценок для реальных значений параметров. Таким образом, в силу хорошей адекватности и большей вычислительной эффективности, гибридная модель имеет преимущество перед SLAW при моделировании DTN сетей с большим количеством узлов.

Литература

1. Brockmann, D. The scaling laws of human travel / D. Brockmann, L. Hufnagel, T. Geisel // Nature. – 2006. – Vol. 439 (Jan). – P. 462-465.
2. Gonzalez M.C. Understanding individual human mobility patterns / M.C. Gonzalez, C.A. Hidalgo, A.-L. Barabasi // Nature. – 2008. – Vol. 453 (Jun). – P. 779-782.
3. Rhee I. On the Levy walk nature of human mobility / I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. Chong // Proc. IEEE INFOCOM (Phoenix, AZ, Apr.) – 2008. – P. 924-932.
4. Rhee I. On the Levy-walk nature of human mobility / I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S.J. Kim, S. Chong. // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 2011. – Vol. 19(3). – P. 630-643.
5. Lim S. Clustered mobility model for scale-free wireless networks / S. Lim, C. Yu, C.R. Das // Proc. IEEE LCN 2006 (Tampa, FL, Nov.). 2006. – P. 231-238.
6. Ghosh J. Sociological orbit aware location approximation and routing (solar) in MANET / J. Ghosh, S.J. Philip, C. Qiao // Ad hoc Netw. – 2007. – Vol. 5. – P. 189-209.
7. Lee K. SLAW: Self-Similar Least-Action Human Walk / K. Lee, S. Hong, S.J. Kim, I. Rhee, S. Chong // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 2012. Vol. 20(2). – P. 515-529.
8. Lee K. Demystifying Levy Walk Patterns in Human Walks / K. Lee, S. Hong, S.J. Kim, I. Rhee, S. Chong. // Technical Report (CSC, NCSU). – [Электронный ресурс]. – 2008. – URL: https://www.csc.ncsu.edu/research/tech/reports.php/Demystifying_Levy_Walk_Patterns.pdf (дата обращения 20.03.2016).

9. Privalov A.Yu. Hybrid Model of Human Mobility for DTN Network Simulation / A.Yu. Privalov, A.A. Tsarev // (доклад принят на 30th European Conference on Modelling and Simulation). 2016.
10. Dubois-Ferriere H. Age matters: Efficient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages / H. Dubois-Ferriere, M. Grossglauser, M. Vetterli // In Proc. ACM MobiHoc, Annapolis, MD. Jun. 2003. – P. 257–266.
11. Varga A. The OMNeT++ discrete event simulation system / Varga András // Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001). – Vol. 9. No. S.185.sn. [Электронный ресурс]. – 2001. – URL: <http://omnetpp.org> (дата обращения 20.03.2016)
12. Till S. An extension of the OMNeT++ INET framework for simulating real-time ethernet with high accuracy / S. Till, H. D. Kenfack, F. Korf, Th. C. Schmidt // Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques – ICST. Brussel. Belgium. – 2011. – P. 375-382.
13. Kotz D. Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth. Dartmouth College. [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://www.crowdad.org/index.html> (дата обращения 20.03.2016).